بررسی توزیع مجدد تنش پسماند کششی مکانیکی بر اثر رشد ترک خستگی*

محمد نوقابی[۱] ایرج ستاری‌فر[۲] حسین حسینی تودشکی[۳]

چکیده *در این پژوهش، اثر بارگذاری خستگی بر توزیع مجدد تنش‌های پسماند مکانیکی در نمونه‌های کششی فشرده بررسی شده است. آزمون‌های تجربی رشد ترک خستگی طبق استاندارد E647 برای نمونه‌های بدون تنش پسماند اولیه و هم‌چنین نمونه‌های دارای تنش پسماند مکانیکی انجام گرفت. برای بررسی ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک و هم‌چنین به‌دست آوردن پارامترهای مکانیک شکست از تحلیل المان محدود به‌کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که تنش پسماند اولیه پس از چند سیکل بارگذاری خستگی، توزیع مجدد می‌یابد که نحوهٔ توزیع مجدد آن وابسته به سطح تنش پسماند اولیه و دامنهٔ بارگذاری سیکلی می‌باشد. مساحت منطقهٔ پلاستیک نوک ترک نیز با شروع بارگذاری خستگی کاهش می‌یابد و پس از تعداد محدودی سیکل، اندازهٔ آن پایدار می‌گردد. در آزمون‌های تجربی، عمر خستگی نمونه‌های دارای تنش پسماند مکانیکی کمتر از عمر خستگی نمونه‌های بدون تنش پسماند به‌دست آمد.*

واژه‌های کلیدی رشد ترک خستگی; ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک; توزیع مجدد تنش پسماند; انتگرال J.

The Effect of Fatigue Crack Growth on Mechanical Residual Stress Redistribution

M. Noghabii I. Sattari-far H. Hosseini Todeshki

Abstract *In this study, the effect of fatigue loading on the redistribution of mechanical residual stresses in compact tension specimens has been investigated. Fatigue crack growth experimental tests were conducted in accordance with E647 standard for specimens with and without initial residual stress. To investigate the crack tip plastic zone and fracture mechanics parameters finite element analysis using ABAQUS was used. The results showed that the initial residual stress redistributed after a few cycles of fatigue loading. Redistribution depends on the amplitude of cyclic loading. Near crack tip plastic zone area also decrease after a few cycles and reaches a stable value. In experimental tests, the fatigue life of specimens with mechanical residual stresses was lower than specimen having no residual stresses.*

Key Words Fatigue crack Growth; Crack Tip plastic Zone; Redistribution of Residual Stress; J Integral.

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۳/٦/۲ و تاریخ پذیرش آن ۹۳/۱۲/۱۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

(۲) نویسندهٔ مسئول: استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران. sattari@aut.ac.ir

(۳) استاد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران.

مقدمه

عمر خستگی یک ویژگی دینامیکی مهم سازه می‌باشد که این ویژگی، تحت تأثیر تنش‌های پسماند در ناحیهٔ نوک ترک می‌باشد. تخمین عمر خستگی سازه در حضور تنش‌های پسماند هنوز چالشی برای مهندسان طراح به‌شمار می‌آید. نتایج تحقیقات سایر محققان نشان داده است که تنش پسماند اثر قابل ملاحظه‌ای روی عمر خستگی سازه‌ها دارد [1-5]. تنش پسماند کششی عمر خستگی را با افزایش نرخ رشد ترک کاهش می‌دهد و تنش پسماند فشاری عمر خستگی را افزایش می‌دهد [6]. در دهه‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای بررسی اثرات تنش‌های پسماند روی نرخ رشد ترک خستگی صورت گرفته است [7-10].

فرهی و همکاران [11] اثر تنش پسماند ناشی از ساچمه‌زنی و تکنیک‌های نفوذ را روی مکانیزم بسته شدن ترک خستگی و رفتار رشد ترک بررسی کردند. نتایج تحقیقات آنها نشان داد که تأخیر رشد ترک و مکانیزم بسته شدن ترک، وابسته به حوزهٔ تنش پسماند است و تنش پسماند فشاری نرخ رشد ترک خستگی را کاهش می‌دهد. ونمان و همکاران [12] به بررسی عددی و تجربی اثر نوع تعریف رفتار ماده روی تنش پسماند ایجاد شده بر اثر بار فشاری مکانیکی روی تنش پسماند ایجاد شده در نمونه‌های CT فولادهای فریتی پرداختند. آنها دریافتند که نوع تعریف رفتار ماده می‌تواند در مقدار پیش‌بینی تنش پسماند مؤثر باشد. سماری و همکاران [13] به بررسی اثر تنش پسماند ناشی از گسترش سرد روی رشد ترک خستگی آلیاژهای آلومینیوم پرداختند. نتایج کار آنها نشان داد تنش پسماند فشاری ناشی از این فرآیند در بهبود عمر خستگی بسیار مؤثر است. وهاب و همکاران [14] به بررسی تجربی اثر تنش پسماند فشاری ناشی از بیش‌بار روی رشد ترک خستگی آلیاژهای آلومینیوم پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بیش‌بار موجب به تأخیر افتادن رشد ترک خستگی می‌گردد. استوارت و همکاران [15] به بررسی قابلیت مکانیک شکست الاستیک خطی و اصل جمع‌آثار برای بیان رشد ترک خستگی در نمونه‌های دارای تنش پسماند ناشی از گسترش سرد سوراخ پرداختند. نتایج آنها نشان داد که این قابلیت برای بیان رفتار رشد ترک وجود دارد. لامی و همکاران [16] با استفاده از مکانیزم فشردن پین، در نمونه‌های آلیاژ آلومینومی تنش پسماند ایجاد کردند و به بررسی المان محدود و تجربی اثر تنش پسماند روی رشد ترک خستگی پرداختند.

دو روش معمول برای محاسبهٔ نرخ رشد ترک خستگی در حوزهٔ تنش‌های پسماند وجود دارد. یک روش با استفاده از اصل جمع‌آثار، نسبت تنش مؤثر را با احتساب اثر تنش پسماند به‌دست می‌آورد [17,18]. روش دیگر مبتنی بر مفهوم بسته شدن ترک می‌باشد که با محاسبهٔ ضریب شدت تنش بازشدگی ترک و سپس محاسبهٔ بازه ضریب شدت تنش مؤثر در ناحیهٔ تنش ناشی از مجموع تنش پسماند و بار اعمالی صورت می‌گیرد [19,20]. اعتبار هر دو روش به‌طور کلی پذیرفته شده است [8].

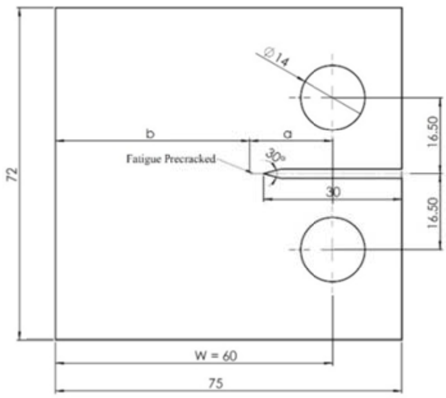
در تحقیقات صورت گرفته توسط سایر محققان، ناحیهٔ پلاستیک نوک ترک کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین استحالهٔ تنش‌های پسماند و توزیع مجدد آن بر اثر بارگذاری خستگی و رشد ترک در اکثر تحقیقات سایر محققان بررسی نشده است. با توجه به این‌که تنش‌های پسماند از نوع تنش‌های ثانویه است و با تنش‌های اولیهٔ ناشی از بارگذاری خارجی تفاوت دارد [21]، این دو نوع تنش و اثرات هر یک به‌طور مجزا در محاسبات آورده شده است. در این پژوهش، رشد ترک خستگی در نمونه‌های CT تحت تأثیر تنش پسماند کششی مکانیکی مورد مطالعه قرار گرفت. رشد ترک خستگی به‌کمک نرم‌افزار المان محدود آباکوس شبیه‌سازی شده و نتایج با داده‌های تجربی مقایسه شده است.

مشخصات قطعه و آزمون‌های خستگی

آزمایش‌های رشد ترک خستگی با دامنهٔ ثابت به‌منظور تعیین ضرایب معادلهٔ پاریس بر روی قطعات CT مطابق استاندارد ASTM E647 [22] با ابعاد و اندازهٔ آزمایش‌های رشد ترک خستگی با دامنهٔ ثابت داده شده در شکل (۱) انجام شد. در شکل (۲) نمایی از نمونهٔ CT ساخته شده توسط فرآیند وایرکات مشاهده می‌گردد. تمامی نمونه‌ها با دستگاه خستگی هیدرولیک با فرکانس ۱۵ هرتز در دمای محیط تحت آزمایش خستگی قرار گرفتند.

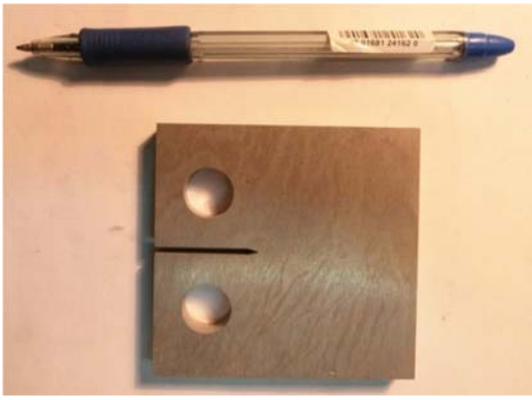
در تمامی تست‌های خستگی، نسبت تنش $R = \frac{P_{min}}{P_{max}}$ ثابت نگه داشته شد و تنها دامنهٔ بارگذاری تغییر داده شد.

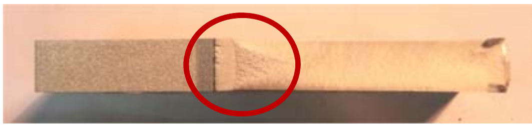
تست‌های خستگی برای دو حالت نمونه‌های بدون تنش پسماند و نمونه‌های دارای تنش پسماند مکانیکی تکرار گردید.



شکل ۱ ابعاد هندسی نمونهٔ CT (ابعاد برحسب میلی‌متر)

طبق استاندارد ASME برای اطمینان از اینکه شیار کاملاً تیز باشد، می‌بایست نمونه را تحت بارگذاری خستگی قرار داد تا یک ترک اولیهٔ خستگی در آن ایجاد گردد [22]. فرآیند ایجاد ترک اولیهٔ خستگی شامل ۲۷ هزار سیکل با نسبت تنش $R = \frac{P_{min}}{P_{max}} = 0.1$ است. این میزان بارگذاری خستگی منجر به ایجاد ترک اولیه با طول بیش از ۲ میلی‌متر در قطعه می‌شود که از نظر استاندارد قابل قبول می‌باشد. در شکل (۳) نمایی از ترک اولیه ایجاد شده به‌کمک خستگی نشان داده شده است.


شکل ۲ نمونهٔ CT ساخته شده توسط فرآیند وایرکات


شکل ۳ ترک اولیهٔ ایجاد شده به‌کمک خستگی

به‌دست آوردن بار بحرانی

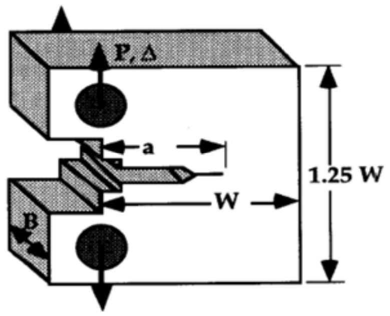
بعد از ایجاد ترک اولیه خستگی، برای به‌دست آوردن بار بحرانی، بارگذاری کششی تا شکست نهایی به قطعه اعمال شد. بار بحرانی مطابق روابط (۱) محاسبه می‌گردد. در شکل (٤) پارامترهای هندسی موجود در روابط (۱) نشان داده شده است [23].

$$P_L = 1.072 \times \eta \times B \times b \times \sigma_Y$$ برای تنش صفحه ای (۱-۱)

$$P_L = 1.455 \times \eta \times B \times b \times \sigma_Y$$ برای کرنش صفحه ای (۲-۱)

که در روابط (۱)، B ضخامت نمونه، b عرض قطعه و η یک ثابت هندسی به شرح زیر است [23].

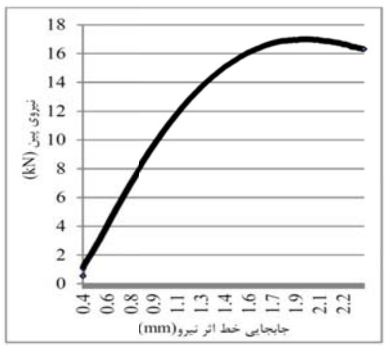
$$\eta = \sqrt{\left(\frac{2a}{b}\right)^2 + \frac{4a}{b} + 2} - \left(\frac{2a}{b} + 1\right) \qquad (۲)$$



شکل ٤ پارامترهای هندسی محاسبهٔ بار بحرانی نمونهٔ CT [23]

در شکل (۵) نمایی از قطعه پس از شکست نهایی مشاهده می‌شود. نمودار نیروی بارگذاری برحسب جابه‌جایی محل پین نیز در شکل (٦) آورده شده است. با توجه به نمودار شکل (٦) بار بحرانی در حدود ١٦.٢ کیلونیوتن می‌باشد. با جایگذاری ابعاد هندسی نمونه در رابطهٔ (۱) مقدار بار بحرانی ۱۷ کیلونیوتن به‌دست می‌آید که با مقدار تجربی تطابق خوبی دارد.


شکل ۵ نمایی از قطعه پس از شکست نهایی



شکل ٦ نمودار نیروی پین برحسب جابه‌جایی

مدل‌سازی المان محدود

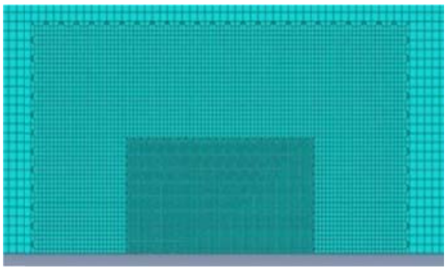
نمونهٔ CT مطابق با ابعاد نشان داده شده در شکل (۱) در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مدل شد. خواص موادی به‌صورت الاستیک-پلاستیک با خاصیت سخت‌شوندگی ایزوتروپیک و ویژگی‌های مکانیکی مطابق با خواص آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰ که از تست کشش نمونه به‌دست آمده و در جدول (۱) نشان داده شده است، تعریف شد. از آن‌جایی که مدل تقارن دارد، برای ساده‌سازی و کاهش زمان محاسبات، تنها نیمی از قطعه مدل شد و شرط مرزی تقارن به خط مرکزی اعمال شد.

جدول ۱ خواص مکانیکی آلیاژ آلومینیوم سری ۵۰۰۰

خاصیت	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	مدول یانگ (GPa)	ضریب پواسون
مقدار	۲۰۰	۳۵۰	۷۰	۰/۳

در شکل (۷) نحوهٔ مش‌بندی نمونه مشاهده می‌شود. برای مش‌بندی نمونه از المان‌های ٤ گره‌ای با نقاط انتگرال‌گیری کاهش‌یافته CPE4R استفاده شد. در مش‌بندی نمونه با نزدیک شدن به نوک ترک، المان‌ها در چندین مرحله ریزتر شدند (شکل ۸). در ناحیهٔ نوک ترک طول المان‌ها حدود ۵۰ میکرون است. برای ایجاد قابلیت تکینی در نوک ترک، المان‌های این ناحیه به المان‌های تکین با نقاط جمع شده در یک‌چهارم (Singular Quarter Point) تغییر یافت [24]. مزیت‌های استفاده از این نوع المان، در پژوهش عبدالعزیز و همکاران معرفی شده است [25].

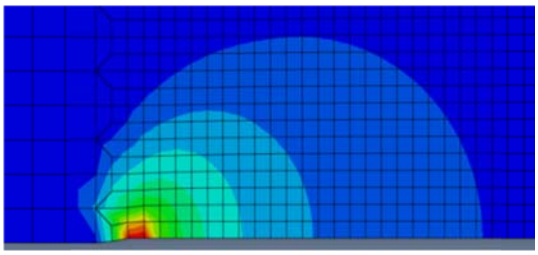

شکل ۷ مش‌بندی نمونه CT



شکل ۸ ریز شدن مش در ناحیهٔ نوک ترک

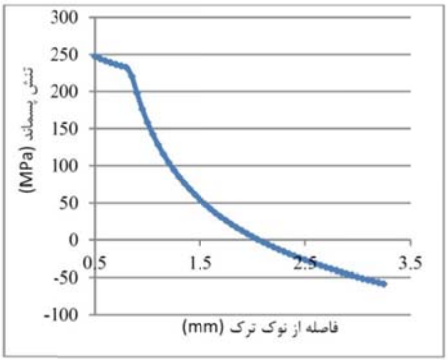
ایجاد تنش پسماند مکانیکی

برای اطمینان از صحت نتایج شبیه‌سازی المان محدود تنش پسماند مکانیکی، مدلی با مشخصات هندسی، جنس مواد و بارگذاری موجود در پژوهش میرزایی سیسان و همکاران [26] تهیه شد. آنها نیز با اعمال بار خارج از صفحه، تنش پسماند مکانیکی در نمونه ایجاد می‌کردند. نتایج مدل المان محدود ایجاد با نتایج ایشان مقایسه گردید. تشابه نتایج المان محدود با نتایج آنها نشان می‌دهد که نحوهٔ شبیه‌سازی و ایجاد تنش پسماند مکانیکی، به‌درستی انجام شده است. لذا شبیه‌سازی برای جنس و ابعاد دلخواه خودمان تغییر داده شد. برای ایجاد تنش پسماند مکانیکی، بار مکانیکی فشاری معادل ۸ کیلونیوتن توسط پین به نمونه اعمال شد. از آن‌جا که بر اثر بار اعمالی، ناحیهٔ اطراف نوک ترک دچار تغییر شکل پلاستیک می‌شود، پس از باربرداری در ناحیهٔ نوک ترک کرنش پلاستیک و در نتیجه تنش پسماند ایجاد می‌گردد. در شکل (۹) کانتور کرنش پلاستیک پسماند پس از باربرداری مشاهده می‌گردد.



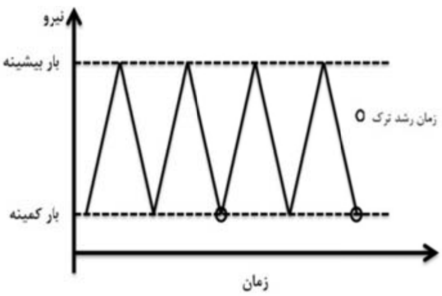
شکل ۹ کانتور کرنش پلاستیک پسماند ایجاد شده بر اثر بار فشاری مکانیکی

در نمودار شکل (۱۰) مقدار تنش پسماند ایجاد شده در ناحیهٔ اطراف ترک برحسب فاصله از نوک ترک مشاهده می‌شود. محور افقی نمودار بیانگر فاصله در راستای رشد ترک می‌باشد. همان‌طور که مشخص است در نواحی نزدیک به نوک ترک، تنش پسماند از نوع کششی و با فاصله گرفتن از آن تنش پسماند فشاری است.



شکل ۱۰ تنش پسماند ایجاد شده در نواحی نوک ترک

شبیه‌سازی رشد ترک در هر مرحله با آزادسازی گره نوک ترک میسر می‌شود. یکی از موارد مهم در این زمینه زمان آزادسازی گره است. زمان آزادسازی گره می‌تواند در بار کمینه، بار بیشینه و یا کمی بعد از بار بیشینه باشد [27]. در صورتی که المان‌های اطراف ترک به قدر کافی ریز باشند، زمان آزادسازی گره ترک تأثیری بر نتایج نخواهد داشت [28]. در این پژوهش، آزادسازی گره در بار کمینه و پس از دو سیکل بارگذاری خستگی مطابق شکل (۱۱) انجام گرفت.



شکل ۱۱ شمای نحوهٔ رشد دادن ترک

مدل رشد ترک خستگی براساس انتگرال J

با توجه به نواحی پلاستیک بزرگ ایجاد شده در نوک ترک بر اثر ایجاد تنش پسماند، مکانیک شکست الاستوپلاستیک (انتگرال J) می‌تواند درک بهتری از نحوهٔ رشد ترک ارائه نماید. فرم این معادله به‌صورت رابطهٔ (۳) می‌باشد [29].

$$\Delta J = \Delta J_{el} + \Delta J_{pl} = J_{el} = \frac{\Delta K^2}{E'} + \frac{\eta A_{pl}}{Bb_0} \quad (۳)$$

که در رابطه فوق، b_0 لیگامنت اولیهٔ نمونه، B ضخامت خالص نمونه، W عرض مؤثر نمونه، A_{Pl} مساحت زیر نمودار بار- جابه‌جایی و η یک ضریب بی‌بعد است که برای نمونه مورد استفاده در این مطالعه از معادلهٔ (٤) به‌دست می‌آید [26]:

$$\eta = 2 + 0.522\frac{b_0}{W} \quad (٤)$$

در این پژوهش از فرم تطبیق‌یافتهٔ معادلهٔ پاریس که توسط داولینگ توسعه یافته و براساس انتگرال J است، برای بیان قانون رشد ترک استفاده می‌شود:

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta J)^m \quad (۵)$$

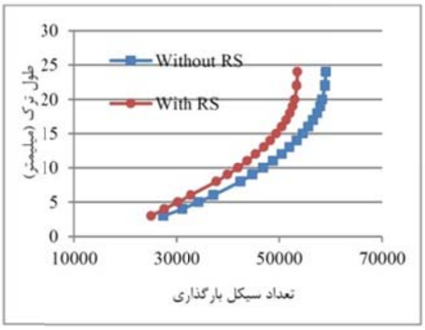
در رابطهٔ (۵) C و m پارامترهای وابسته به جنس می‌باشند که از تست‌های تجربی به‌دست می‌آیند. عمر خستگی قطعه را در فاصله طول ترک اولیهٔ a_i تا طول ترک نهایی a_f را با انتگرال‌گیری از رابطهٔ (۵) می‌توان مشخص نمود. با توجه به این که در شبیه‌سازی المان محدود، ترک به‌صورت ناپیوسته رشد داده می‌شود، این انتگرال‌گیری تبدیل به مجموع جملات می‌شود و به‌صورت رابطهٔ (٦) نوشته می‌شود:

$$N = \sum_{i=a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta J)^m} \quad (٦)$$

دقت شود که در رابطهٔ فوق da میزان رشد ترک در هر مرحله می‌باشد که برابر طول المان در ناحیهٔ اطراف ترک (۵۰ میکرون) است.

نتایج و بحث

نتایج تست‌های تجربی. در شکل (۱۲) نمودار طول ترک برحسب تعداد سیکل بارگذاری حاصل از تست‌های تجربی برای نمونه‌های بدون تنش پسماند و نمونه‌های دارای تنش پسماند مشاهده می‌گردد. همان‌طور که مشخص است رشد ترک در نمونه‌های دارای تنش پسماند مکانیکی سریع‌تر از نمونهٔ بدون تنش پسماند می‌باشد.



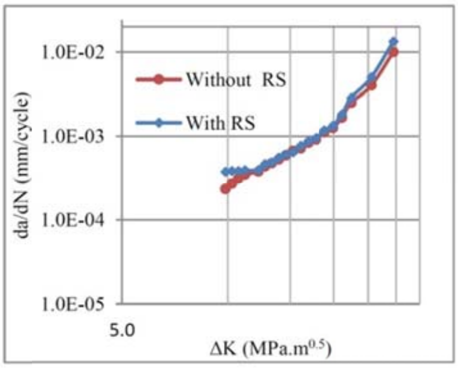
شکل ۱۲ طول ترک بر اثر بارگذاری خستگی

طبق تست‌های تجربی، پارامترهای مربوط به جنس ماده در رابطهٔ (۵) به قرار زیر می‌باشد:

$$\frac{da}{dN} = 0.00156(\Delta J)^{1.193} \quad (۷)$$

در شکل (۱۳) نمودار نرخ رشد ترک برحسب بازهٔ ضریب شدت تنش مشاهده می‌شود. نتایج تجربی نشان می‌دهد که در ابتدای سیکل‌های بارگذاری، نرخ رشد ترک در نمونهٔ دارای تنش پسماند بسیار سریع‌تر از

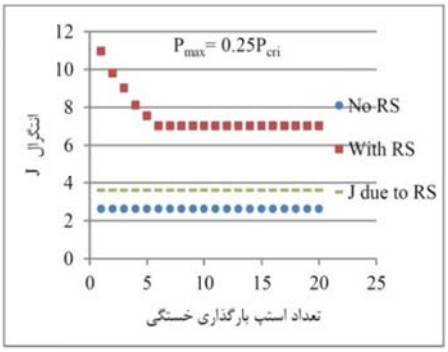
نمونهٔ بدون تنش پسماند می‌باشد. پس از این‌که ترک مقداری رشد نمود، نرخ رشد ترک خستگی تقریباً برابر می‌شود که علت این امر می‌تواند استحالهٔ تنش‌های پسماند اولیهٔ نمونه باشد.



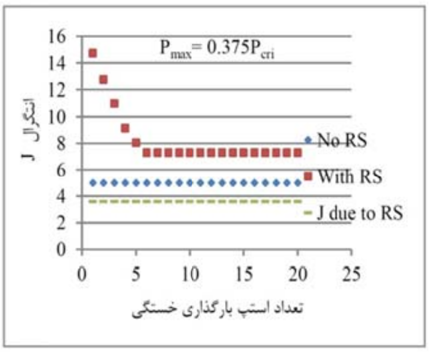
شکل ۱۳ نرخ رشد ترک خستگی برحسب بازهٔ ضریب شدت تنش

اثر تنش پسماند بر انتگرال. در شکل (۱٤) نمودار تغییرات انتگرال J بر اثر بارگذاری خستگی برای بارگذاری با دامنه‌های متفاوت نشان داده شده است. در این نمودارها، انتگرال J در نمونهٔ بدون تنش پسماند، نمونهٔ دارای تنش پسماند و هم‌چنین انتگرال J ناشی از تنش پسماند به‌طور مجزا نمایش داده شده است. منظور از J due to RS مقادیر خوانده شده در اولین گام پس از برداشتن بار فشاری می‌باشد و در سیکل‌های بعدی بی‌معنا می‌باشد؛ از این رو، در نمودار به‌صورت خط‌چین نمایش داده شده است که یعنی یک مقدار ثابت است. اختلاف J در این نمودارها به‌خاطر وجود تنش پسماند می‌باشد؛ یعنی یک مقدار از انتگرال J با تنش پسماند ناشی از بارگذاری خارجی و یک مقدار ناشی از تنش پسماند می‌باشد. نکتهٔ دیگر که باید توجه شود این است که J خاصیت خطی ندارد لذا جمع جبری در این‌جا معنی ندارد؛ ولی چنان‌چه این مقادیر J را تبدیل به K بکنیم خاصیت جبری نیز برقرار می‌شود.

همان‌طور که مشخص است انتگرال J در نمونهٔ دارای تنش پسماند کششی مقادیری بزرگ‌تر از نمونهٔ بدون تنش پسماند دارد؛ از این‌رو، طبق پیش‌بینی باید سرعت رشد ترک خستگی افزایش یابد و عمر خستگی کاهش یابد که با نتایج تجربی کاملاً سازگار است. نکتهٔ قابل توجه دیگر کاهش قابل توجه انتگرال J در چند گام ابتدایی است که علت این امر نیز استحالهٔ تنش‌های پسماند و توزیع مجدد آن در چند گام ابتدایی می‌باشد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، مقدار انتگرال J پس از توزیع مجدد تنش پسماند، تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارد و بایستی در محاسبات عمر خستگی لحاظ گردد. بسیاری از محققان، این تغییرات را در محاسبات وارد نمی‌کنند که منجر به تخمین محافظه‌کارانه‌تر عمر خستگی می‌گردد.



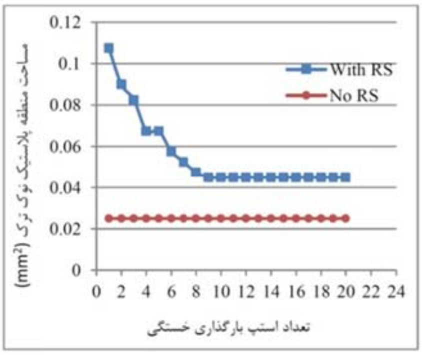
شکل ۱٤ تغییرات انتگرال J بر اثر بارگذاری خستگی برای بار P_{max}= 4 kN و R=0.1



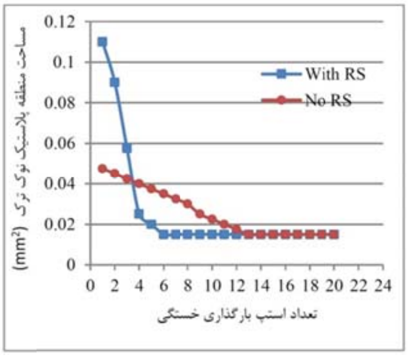
شکل ۱۵ تغییرات انتگرال J بر اثر بارگذاری خستگی برای بار P_{max}= 6 kN و R=0.1

لازم به ذکر است که در شکل‌های (۱۵ و ۱٤)، محور افقی تعداد گام‌های بارگذاری در نرم‌افزار می‌باشد که با تعداد سیکل خستگی متفاوت می‌باشد. همان‌طور که در قبل توضیح داده شد، تعداد سیکل خستگی لازم برای رشد ترک به اندازهٔ طول المان از رابطهٔ (٦) به‌دست می‌آید. به عبارت دیگر هر گام در نرم‌افزار، بیانگر تعداد زیادی سیکل بارگذاری خستگی می‌باشد. با تغییرات طول ترک و بارگذاری، مقادیر انتگرال J نیز تغییر می‌کند و لذا تعداد سیکل خستگی معادل نیز تغییر می‌کند. بنابراین محاسبه تعداد سیکل خستگی معادل با هر گام در نرم‌افزار باید برای هر گام به‌طور مجزا محاسبه گردد. با جایگذاری این مقادیر در رابطهٔ (٦)، تعداد سیکل خستگی که پس از آن تنش پسماند استحاله می‌گردد حدوداً ٤٠ سیکل می‌باشد. توزیع مجدد تنش پسماند اولیه بر اثر بارگذاری سیکلی در سیکل‌های ابتدایی، در مقالات سایر محققان نیز اشاره شده است [30, 31].

تغییرات مساحت منطقهٔ پلاستیک نوک ترک بر اثر خستگی. در شکل‌های (۱۷ و ۱٦) نمودار تغییرات مساحت پلاستیک نوک ترک بر اثر بارگذاری خستگی برای بارگذاری با دامنه‌های متفاوت نشان داده شده است. همان‌طور که مشخص است مساحت ناحیهٔ پلاستیک در نمونهٔ دارای تنش پسماند کششی مقادیری بزرگ‌تر از نمونهٔ بدون تنش پسماند دارد. کاهش مساحت ناحیهٔ پلاستیک نیز با توجه به توزیع مجدد تنش پسماند قابل پیش‌بینی بود. همان‌طور که در این دو نمودار مشخص است، افزایش دامنهٔ بارگذاری منجر به استحالهٔ سریع‌تر تنش‌های پسماند می‌گردد. علت این امر این است که با افزایش دامنهٔ بارگذاری، تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ‌تری در نوک ترک به‌وجود می‌آید و این تغییر شکل‌ها منجر به تغییر کرنش‌های پسماند و در نتیجه تغییر تنش‌های پسماند می‌گردد.



شکل ١٦ تغییرات مساحت منطقهٔ پلاستیک نوک ترک بر اثر بارگذاری خستگی در $P_{max} = 4$ kN



شکل ١٧ تغییرات مساحت منطقهٔ پلاستیک نوک ترک بر اثر بارگذاری خستگی در $P_{max} = 6$ kN

نتیجه‌گیری

تنش‌های پسماند تأثیر قابل توجهی روی عمر خستگی و مشخصات شکست نمونه‌ها دارد. تنش‌های پسماند بر اثر بارگذاری خستگی توزیع مجدد می‌یابند که بایستی این توزیع مجدد را در محاسبات لحاظ کرد. در این قسمت نتایج این تحقیقات به‌طور خلاصه بیان می‌گردد:

- تنش پسماند کششی نرخ رشد ترک خستگی را افزایش می‌دهد که این امر منجر به کاهش عمر خستگی می‌گردد.
- تنش پسماند اولیه پس از چندین سیکل بارگذاری خستگی، توزیع مجدد می‌یابد که در تحلیل‌ها می‌بایست در نظر گرفته شود.

- دامنهٔ بارگذاری خستگی نیز تأثیر زیادی روی توزیع مجدد تنش پسماند دارد. دامنهٔ بارگذاری بالاتر، منجر به کاهش بیشتر اندازهٔ تنش پسماند اولیه در نمونه‌ها می‌گردد.
- ناحیهٔ پلاستیک ایجاد شده در نوک ترک می‌تواند به‌عنوان معیاری برای بررسی رشد ترک خستگی به‌کار رود. این ناحیه متأثر از تنش پسماند اولیه می‌باشد و پس از چندین سیکل، این ناحیه نیز تغییر ابعاد می‌دهد.

فهرست علائم

P_L	بار بحرانی
B	ضخامت نمونه
b	عرض نمونه
a	طول ترک
A_{pl}	سطح زیر نمودار بار – جابه‌جایی
ΔJ_{el}	بازهٔ انتگرال J الاستیک
ΔJ_{pl}	بازهٔ انتگرال J پلاستیک
$\frac{da}{dN}$	نرخ رشد ترک خستگی
R	نسبت تنش

مراجع

1. Bucci, R.J., "Effect of residual stress on fatigue crack growth rate measurement", *ASTM STP*, Vol. 743, pp. 28–47, (1981).
2. McClung, R.C., "A literature survey on the stability and significance of residual stresses during fatigue", *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.*, Vol. 30, pp. 173–205, (2007).
3. Vaidya, W.V., Staron, P. and Horstmann, M., "Fatigue crack propagation into the residual stress field along and perpendicular to laser beam butt-weld in aluminium alloy AA6056", *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, Vol. 35, 399–411, (2011).
4. Maddox, S.J., "*Fatigue strength of welded structures*", Abington Publishing; (1991).
5. Withers, P.J., "Residual stress and its role in failure", *Rep Prog Phys*, Vol. 70, pp. 2211–2264, (2007).
6. Barsoum, Z., Barsoum, I., "Residual stress effects on fatigue life of welded structures using LEFM", *Engineering Failure Analysis*, Vol. 16, pp. 449–467, (2009).
7. LaRue, J.E. and Daniewicz, S.R., "Predicting the effect of residual stress on fatigue crack growth", *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, pp. 508–515, (2007).
8. Servetti, G. and Zhang, X., "Predicting fatigue crack growth rate in a welded butt joint: The role of effective R ratio in accounting for residual stress effect", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 76, pp. 1589–1602, (2009).
9. Ghidini, T. and Dalle Donne, C., "Fatigue crack propagation assessment based on residual stresses obtained through cut-compliance technique", *Fatigue Fract Engng Mater Struct*, Vol. 30, pp. 214–222, (2006).
10. Bussu, G. and Irving, P.E., "The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminum joints", *International Journal of Fatigue*, Vol. 25, pp. 77–88, (2003).
11. Farrahi, G.H., Majzoobi, G.H., Hosseinzadeh, F. and Harati, S.M., "Experimental evaluation of the effect of residual stress field on crack growth behaviour in C(T) specimen", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 1772–1782, (2006).
12. Wenman, M.R., Price, A.J., Steuwer, A., Chard-Tuckey, P.R. and Crocombe, A., "Modelling and experimental characterisation of a residual stress field in a ferritic compact tension specimen", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 86, pp. 830–837, (2009).

13. Semari, Z., Aid, A., Benhamena, A., Amrouche, A., Benguediab, M., Sadok, A. and Benseddiq, N., "Effect of residual stresses induced by cold expansion on the crack growth in 6082 aluminum alloy", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 99, pp. 159–168, (2013).
14. Wahab, M.A., Rohrsheim, G.R. and Park, J.H., "Experimental study on the influence of overload induced residual stress field on fatigue crack growth in aluminium alloy", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153–154, pp. 945–951, (2004).
15. Stuart, D.H., Hill, M.R. and Newman, J.C., "Correlation of one-dimensional fatigue crack growth at cold-expanded holes using linear fracture mechanics and superposition", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 78, pp. 1389–1406, (2011).
16. Lammi, C.J. and Lados, D.A., "Numerical predictions and experimental measurements of residual", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol.78, pp. 1114–1124, (2011).
17. Parker, A.P., "Stress intensity factors, crack profiles, and fatigue crack growth rates in residual stress fields". In: Residual stress effects in fatigue, ASTM STP 776, American Society for Testing and Materials, p. 13–31, (1982).
18. Itoh, Y.Z., Suruga, S. and Kashiwaya, H., "Prediction of fatigue crack growth rate in welding residual stress field", *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 397–407, (1989).
19. Beghini, M., Bertini, L. and Vitale, E., "Fatigue crack growth in residual stress fields: experimental results and modeling, Fatigue Fract Engng Mater Struct", Vol. 17, pp. 1433–1444, (1994).
20. Liljedahl, C.D.M, Tan, M.L., Zanellato, O., Ganguly, S., Fitzpatrick, M.E. and Edwards, L., "Evolution of residual stresses with fatigue loading and subsequent crack growth in a welded aluminum alloy middle tension specimen", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 75, pp. 3881–3894, (2008).
21. EN 13445-3, Unfired pressure vessels part 3: Design, European Standard, (2002).
22. ASTM E647-00, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, pp. 603–644, (2002).
23. Anderson, T.L., "*Fracture Mechanics Fundamentals and Applications*", Third Edition, Boca Raton: Tylor & Francis Group, (2005).
24. Abaqus, D.S., Ver, 6.12. Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, RI, USA, 2012.
25. Abdelaziz, Y., Benkheira, S., Rikioui, T. and Mekkaoui, A., "A double degenerated finite element for modeling the crack tip singularity", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 34, pp. 4031–4039, (2010).
26. Mirzaee-Sisan, A., Truman, C.E., Smith, D.J. and Smith, M.C., "Interaction of residual stress with mechanical loading in an austenitic stainless steel", Fatigue Fract Engng Mater Struct, Vol. 31, pp. 223–233, (2007).
27. Solanki, K., Daniewicz, S.R. and Newman, J.C., "Finite element analysis of plasticity induced fatigue crack closure: an overview", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 71, pp. 149–171, (2004).
28. Solanki, K., Daniewicz, S.R. and Newman, J.C., "Finite element modeling of plasticity-induced crack closure with emphasis on geometry and mesh refinement effects", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 70, No. 12, pp. 1475-1489, (2003).
29. ASTM E1820-01, Standard test method for measurement of fracture toughness, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 03.01, pp. 1031–1076, (2001).
30. Benedetti, M., Fontanari, V., Scardi, P., Ricardo, C.L.A. and Bandini, M., *Reverse bending fatigue of shot peened 7075-T651 aluminium alloy: The role of residual stress relaxation*, "International Journal of Fatigue", Vol. 31, pp. 1225–1236, (2009).
31. Zhuang, W.Z. and Halford, G.R., "Investigation of residual stress relaxation under cyclic load", *International Journal of Fatigue*, Vol. 23, pp. 31–37, (2001).